Сельское хозяйство

УДК 663.52

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

О.А. Юрина[1,2], О.О. Иванов[1]

Кафедра «Технологическое оборудование и пищевые технологии», ГОУ ВПО «ТГТУ» (1); ЗАО «Сигнал», г. Тамбов (2); yurina82@bk.ru

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: биогаз; биоэнергетическая установка; математическая модель; культивирование микроорганизмов.

Аннотация: Дано описание автономной биоэнергетической установки АБЭУ-20, разработанной для производства биогаза на основе мелассной послеспиртовой барды, приведены основные параметры и характеристики биоустановки. Представлены кинетические модели, наиболее широко применяемые в практических задачах расчета процесса культивированя микроорганизмов. Разработана математическая модель непрерывного процесса анаэробного культивирования микроорганизмов с получением биогаза. Дано описание экспериментального исследования.

Обозначения

D – скорость разбавления, ч$^{-1}$;	x – концентрация биомассы, кг/м^3;
K – коэффициент Михаэлиса;	α^x – экономический коэффициент, кг/кг;
P – концентрация целевого продукта; кг/м^3;	β – коэффициент накопления продукта, кг/кг;
t – время, с;	μ – удельная скорость роста, с$^{-1}$.

Биогазовые технологии призваны решать важные проблемы государственного значения: 1) в экологии – создание безотходных производств, уменьшение «парниковых» выбросов; 2) в энергетике – переработка биомассы и органических отходов в газообразное топливо, тепловую и электрическую энергию; 3) в агропромышленном комплексе – производство экологически чистых высокоэффективных органических удобрений, повышение урожайности, повышение плодородия почв и их экологической чистоты; 4) в социальном секторе – создание комфортных условий быта и труда для каждого конкретного жителя планеты вне зависимости от мест его обитания и деятельности [12].

ЗАО «Сигнал» при поддержке Министерства образования и науки (в рамках государственной программы «Экологически чистая энергетика») занимается конструированием биогазовых установок. Модульный принцип, заложенный в конструкции, позволяет при необходимости сдваивать установки, эквивалентно наращивая производительность. Получаемый в биореакторе газ сгорает в тех же бытовых конфорках и горелках, что и обычный.

Еще более замечателен (во всяком случае, экономически) второй продукт биоустановки – жидкие органические удобрения. Технологический режим подобран так, что они получаются экологически абсолютно чистыми – без малейших следов нитритов и нитратов, болезнетворной микрофлоры.

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

Согласно маркетинговым исследованиям потребность в биогазовых установках такого типа, способных работать в любых климатических условиях, только по России на ближайшие 5 лет составит около 50 тыс. штук [10].

Биоустановка рассчитана на эксплуатацию в географических районах сейсмичностью до 6 баллов принятой в Российской Федерации по двенадцатибальной шкале.

С целью определения параметров оптимального технологического режима (объема получаемого биогаза и концентрации метана в газе) процесса анаэробной ферментации жидких органических отходов и достижения максимальной интенсивности процесса необходимо создать наиболее благоприятные условия для различных групп микроорганизмов, находящихся в биореакторе, то есть создать оптимальный технологический режим. Для этого были созданы лабораторные установки, представляющие собой биореакторы объемом 100 л, и разработана методика проведения эксперимента, которая заключается в следующем.

Ежедневно в два фарфоровых тигля отбирается по 50 мл метановой бражки и послеспиртовой барды и проводятся следующие химические анализы: на влажность, содержание сухих веществ субстрата и барды, содержание органических веществ, зольность, суточный объем выделившегося биогаза, состав биогаза (CH_4 и CO_2).

Биореактор заполняется свежей метановой бражкой при температуре $T = 52…54$ °С. После начала газовыделения (фиксируется газовым счетчиком) отбирается 5 % метановой бражки и добавляется 5 % свежего субстрата – послеспиртовой барды. Загрузка производится каждые сутки.

При нормальном течении процесса (pH ≥ 7, газовыделение постоянное с одинаковыми объемами) опыт продолжают до 10 загрузок, после чего переходят к опытам с 10%-й, 15%-й и т.д. заменой свежего субстрата. В случае остановки процесса (прокисание pH < 7, исключая дни загрузки, когда pH определяется кислотностью барды) опыт прекращается. Барду необходимо нейтрализовать аммиачной водой и возобновить исследования по вышеуказанной программе.

Полученный биогаз после очистки собирается и хранится до времени использования в газгольдере. От газгольдера к месту использования в бытовых или других приборах биогаз проводят по газовым трубам. Переработанное в реакторе биогазовой установки сырье, превратившееся в биоудобрение, выгружается и вносится в почву или используется как кормовая добавка для животных.

В ходе лабораторных исследований были получены результаты, сравнение которых с теоретическими данными [16] доказало, что продукт метаболизма можно считать биогазом, газ горит, имеет пламя синего цвета. Объем выделяющегося биогаза в сутки в 4–5 раз превышает объем загружаемого субстрата. Содержание метана в выделяющемся газе колеблется от 70 до 88 %, значение pH после 10 суток брожения понижается. В этом случае необходимо подщелачивание бражки или уменьшение объема загружаемого субстрата.

Так как с увеличением дозы загрузки наблюдается понижение pH, потому что кислотность свежей барды достаточно низкая и составляет 4,5…5,5, то чтобы избежать подщелачивания бражки, было принято решение уменьшить объем свежего субстрата пока значение pH не нормализуется.

Прежде, чем перейти к проектированию биогазовой установки, был проведен анализ существующих математических моделей.

В настоящее время известно большое число математических моделей кинетики роста микробных популяций, рассмотренных в обзорных работах [9]. В связи с этим при описании конкретного микробиологического процесса важное значение приобретает задача идентификации различных моделей и постановка специальных дискриминирующих экспериментов.

В табл. 1 представлены кинетические модели, наиболее широко применяемые в практических задачах расчета процесса культивирования микроорганизмов.

Таблица 1

Кинетические модели на основе обобщенных схем ферментативных реакций

Схема реакции	Кинетическая зависимость	Примечания
Взаимодействие субстрата S и фермента E	$\mu = \dfrac{K_\text{P}[\text{E}][\text{S}]}{\dfrac{K_\text{S}+K_\text{P}}{K_\text{S}}+[\text{S}]} =$ $= \dfrac{W[\text{S}]}{K_\text{S}+\dfrac{K_\text{P}}{K_\text{S}}+[\text{S}]};$ $\mu = \mu_{\max}\dfrac{S'}{K_\text{S}+S}$	$W = [\text{E}]K_\text{P}$; P – продукт реакции; I – ингибитор реакции (продукт метаболизма); $S = [\text{S}]K_\text{S}$; K_S, K_P – кинетические коэффициенты
Конкурентное ингибирование	$\mu = \mu_{\max}\dfrac{S}{K_\text{S}+S+K_\text{I}};$ $\mu = \mu_{\max} S/(K_\text{S}+S+K_\text{P}(S_0-S)+$ $+K_{\text{P}\text{г}}S(S_0-S))$	$K_{\text{P}\text{г}}$ – кинетический коэффициент
Общая схема взаимодействия субстрата, фермента и ингибитора	$\mu_\text{S} = \mu_{\max}\dfrac{S}{K_\text{S}+S+K_\text{г}(S_0-S)}$	При малых $K_{\text{P}\text{г}}$ – конкурентное ингибирование
	$\mu_\text{S} = \mu_{\max}\dfrac{S}{K_\text{S}+S}\,\dfrac{1/K_{\text{P}\text{г}}}{1/K_{\text{P}\text{г}}+S_0-S}$	При $K_\text{S} = K_\text{P}/K_\text{г}$ – неконкурентное торможение
	$\mu_\text{S} = \mu_{\max}\dfrac{S}{K_\text{S}+S+K_\text{P}S(S_0-S)}$	При малых $K_\text{г}$ – соединение ингибитора с ферментным комплексом

Особенности массообменных эффектов в биотехнологических системах связаны с процессами ферментации, когда одновременно с ростом и развитием популяции микроорганизмов осуществляется перенос массы (транспорт питательных веществ и продуктов метаболизма) и энергии (поглощение и выделение тепла при биохимических превращениях в многофазной системе).

В итоге была разработана математическая модель непрерывного процесса анаэробного культивирования микроорганизмов с получением биогаза:

$$\begin{cases} \mu(S) = \mu_{\max}\dfrac{S_1}{K_1+S_1}\cdots\dfrac{S_4}{K_4+S_4}; \\ \dfrac{dx}{dt} = \mu(S)x - Dx; \\ \dfrac{dS_1}{dt} = D(S_{10}-S_1) - \alpha_1^x\mu(S)x; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dfrac{dS_4}{dt} = D(S_{10}-S_4) - \alpha_4^x\mu(S)x; \\ \dfrac{dP}{dt} = \beta\mu(S)x. \end{cases} \tag{1}$$

Для решения данной системы необходимо задать начальные условия: концентрации микроорганизмов x_0, компонентов субстрата S_{0i} и целевого продукта P_0 в начальный момент времени, максимальную скорость роста μ_{max}, коэффициенты Михаэлиса K_i и экономические коэффициенты α_i^x по каждому компоненту субстрата, коэффициент накопления продукта β.

Начальные условия для модели можно записать в следующем виде:

$$x(t_0) = x_0;$$
$$S_i(t_0) = S_0; \tag{2}$$
$$P(t_0) = 0.$$

Полученные системы дифференциальных уравнений удобнее всего решать методом Эйлера первого порядка, достоинством которого является простота осуществления вычислительного процесса и быстродействие. Суть метода заключается в следующем.

Пусть дано обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка

$$y' = f(x, y), \quad x \in [x_0, b] \tag{3}$$

с начальными условиями

$$y(x_0) = y_0. \tag{4}$$

Будем считать, что для данной задачи выполняются требования, обеспечивающие существование и единственность ее решения $y = y(x)$.

Решение данной системы будем искать в виде

$$y_{i+1} = y_i + hf(x_i, y_i), \text{ при } i = 0, 1, \ldots, n, \tag{5}$$

где $h = \dfrac{b - x_0}{n}$, $x_i = x_0 + ih$.

Алгоритм решения уравнений математической модели заключается в следующем: на первом этапе осуществляем ввод исходных данных: S_{i0}, x_i, P_0, K_I, α^x, β, t_0, $t_к$, шаг.

Далее определяем μ(S) при текущих (или начальных, или измененных) концентрациях субстрата. После этого можно определить изменение концентраций S_i, P, x на текущем отрезке времени в зависимости от μ(S).

Полученные значения следует вывести и перейти на следующий отрезок времени, проделав все заново. Вывод конечных концентраций S_i, P, x можно произвести по окончании обозначенного промежутка времени.

Целью экспериментального исследования процесса получения биогаза на основе мелассной послеспиртовой барды являлось накопление экспериментальных результатов, с использованием которых была проверена адекватность разработанной математической модели, а также определены технологические параметры процесса.

Разработанная ЗАО «Сигнал» биогазовая установка АБЭУ-20 (рис. 1) предназначена для переработки жидких органических отходов бродильных производств, а также стоков животноводческих ферм и растениеводства в горючий газ и тепловую энергию, а также в жидкие органические удобрения.

Биотехническая переработка мелассной послеспиртовой барды в биореакторе осуществляется метангенерирующей бактериально-химической системой, разлагающей сложные органические вещества барды до метана, углекислого газа и органических удобрений.



Рис. 1. Биогазовая установка АБЭУ-20

Температура ферментации составляет 53…54 °С и поддерживается потоком биомассы, взятой из биореактора насосом и пропущенной через обогреваемый водой теплообменник.

Данный поток биомассы служит также для разрушения образующейся корки, тормозящей процессы ферментации и газовыделения [5].

Основные параметры и характеристики биоустановки приведены в табл. 2.

Серьезный интерес к российским биогазовым установкам уже проявили несколько стран СНГ (в частности, Казахстан и Белоруссия), Объединенные Арабские Эмираты, ЮАР, а также страны Северной Европы – Дания и Финляндия. Но самое знаменательное признание российских достижений пришло из Китая – мирового лидера по освоению биогазовых технологий. С одной из китайских фирм уже достигнута договоренность о том, что она будет выпускать биогазовые установки на основе российских разработок.

Россия имеет все возможноти, чтобы войти в число государств, активно развивающих биотехнологию, и занять свое достойное место. Этому способствуют: высокий образовательный и научно-технологический потенциал; наличие ключевых факторов для развития микробиологической промышленности (дешевой энергии, пресной воды, ресурсов для интенсивного развития сельского хозяйства); обширная территория; благоприятная экономическая конъюктура.

По совокупности указанных параметров РФ имеет наиболее благоприятные условия для развития биотехнологической промышленности.

Таблица 2

Основные параметры и характеристики биоустановки АБЭУ-20

Основные параметры и характеристики	АБЭУ-20
Рабочий объем биореактора, м^3 (л), не более	20 (20000)
Объем биомассы, м^3 (л), не более	18 (18000)
Рабочая температура биореактора, °С,	53…54
Рабочее давление биореактора, МПа (кгс/см^2)	0,0002 (0,002)
Рабочий объем газгольдера, м^3 (л)	7 (7000)
Объем мерного бака, м^3 (л)	1,2 (1200)
Объем накопительного бака, м^3 (л)	1,2 (1200)
Производительность по газу, м^3/сут.	16…32
Производительность по биоудобрениям, т/сут.	1,8
Объем загрузки сырья, м^3 (л)	1,8 (1800)

Список литературы

1. Белоусов, В.В. Аппаратурное оформление процесса получения биогаза на основе жидких органических отходов / В.В. Белоусов, Е.Д. Лапин, О.А Юрина // Труды ТГТУ : сб. ст. магистрантов / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2006. – Вып. 4. – С. 37–41.
2. Василов, Р.Г. Биоэкономика как следующий шаг развития – шанс для России / Р. Г. Василов // Вестн. биотехнологии. – 2008. – Т. 4, №1. – С. 28–33.
3. Виестур, У.Э. Системы ферментации / У.Э. Виестур, А.М. Кузнецов, В.В. Савенков. – Рига : Зинатне, 1986. – 174 с.
4. Дворецкий, С.И. Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов / С.И. Дворецкий, А.Ф. Егоров, Д.С. Дворецкий. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 224 с.
5. Долгунин, В.Н. Ферментаторы : лекции к курсу / В.Н. Долгунин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1996. – 63 с.
6. Зюзина О.А. Основы биотехнологии и промышленной технологии : учеб. пособие / О.А. Зюзина. – Тамбов : Изд-во Тамб. ин-та хим. машиностроения, 1990. – 89 с.
7. Карев, В.И. К разработке получения биогаза на основе мелассной послеспиртовой барды / В.И. Карев, О.А. Юрина // Труды ТГТУ : сб. ст. магистрантов / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2006. – Вып. 4. – С. 48–52.
8. Кухаренко, А.А. Безотходная технология этилового спирта / А.А. Кухаренко, А.Ю. Винаров. – М. : Энергоатомиздат, 2001. – 272 с.
9. Лапин, Е.Д. Математические модели биотехнологических процессов / Е.Д. Лапин, В.В. Белоусов, О.А. Юрина // Труды ТГТУ : сб. ст. магистрантов / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2006. – Вып. 4. – С. 41–45.
10. Панцхава, Е.С. Биоэнергетика – самостоятельная часть современной энергетики / Е.С. Панцхава // Биоэнергетика. – 2007. – № 1 (6). – С. 16.
11. Биомасса – реальный источник коммерческих топлив и энергии. Ч. 1. Мировой опыт / Е.С. Панцхава [и др.] // Теплоэнергетика. – 2001. – № 2. – С. 21.
12. Панцхава, Е.С. Российские биогазовые технологии и их коммерциализация / Е.С. Панцхава, В.А. Пожарнов // Сборник трудов Международной конференции «Энергоэффективность крупного промышленного региона», 7–9 июня 2004 г., Донецк, Украина / Специализир. выст. центр «ЭкспоДонбасс». – Донецк, 2004. – С. 41–43.
13. Пат. № 2082682 Российская Федерация, МПК6 С 02 F 3/28. Установка для производства биогаза / Осмонов О.М., Ковалев А.А., Ножевникова А.Н., Мельник Р.А. ; заявитель и патентообладатель Всерос. науч.-исслед. ин-т электрификации сельского хозяйства. – № 93003823/25 ; заявл. 26.01.93 ; опубл. 27.06.97, Бюл. № 18.
14. Пат. № 2065408 Российская Федерация, МПК6 С 02 F 3/28, 11/04. Биогазовая установка / Ильин А.К., Ковалев О.П., Тимошенко В.А. ; заявитель и патентообладатель Ин-т проблем морских технологий Дальневосточ. отд-ния Рос. акад наук. – № 94011881/26 ; заявл. 05.04.94 ; опубл. 20.08.96, Бюл. № 23.
15. Пат. № 2198853 Российская Федерация, МПК7 С 02 F 11/04. Анаэробный биореактор для переработки жидких отходов / Каранов Ю.А., Кошель М.И. ; заявитель и патентообладатель Укр. науч.-исслед. ин-т спирта и биотехнологии продовольств. продуктов. – № 2001117711/12 ; заявл. 26.06.2001 ; опубл. 20.02.2003, Бюл. № 5, ч. II.
16. Райнхардт, Г. Анаэробное сбраживание и производство биогаза из биологических отходов и энергетических сельскохозяйственных культур / Г. Райнхардт // Биотехнолгия. – 2009. – № 1. – С. 58–62.

Basic Approaches to Biogas Units Designing

O.A. Yurina[1,2], O.O. Ivanov[1]

Department "Production Equipment and Food Technologies", TSTU (1); ZAO «Signal», Tambov (2); yurina82@bk.ru

Key words and phrases: bioenergetics device; biogas; cultivation of microorganisms; mathematical model.

Abstract: The paper describes the ABED-20 autonomous bioenergetics device designed for biogas production on the basis of molasses vinasse; the main parameters and characteristics of bio device are given. The kinetic models widely used in practical tasks of calculation of the microorganisms' cultivation process. The mathematical model of continuous process of anaerobic cultivation of microorganisms with biogas production is developed. The experimental research is described.

Haupteinstellungen zur Projektierung der Biogasanlagen

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung der autonomen bioenergetischen Anlage ABEU-20, die für die Erzeugung des Biogases auf Grund des melassischen Nachspiritustresters erarbeitet wurde, angegeben. Es sind die Hauptparameter und Charakteristiken der Anlage angeführt. Es sind die kinetischen Modelle, die in den praktischen Aufgaben der Berechnung des Prozesses des Kultivierens der Mikroorganismen sehr breit verwendet werden, dargelegt. Es ist das matematische Modell des ununterbrochenen Prozesses des anaerobischen Kultivierens der Mikroorganismen mit Erhultung vom Biogas erarbeitet. Es ist die Beschreibung der experimentellen Untersuchung angegeben.

Approches essentielles à la conception des installations bigazeuses

Résumé: Est donnée la description de l'installation bigazeuse autonome ABEU-20 élaborée pour la production du bigaz à la base de drêche de molasses, sont cités les essentiels paramètres et les caractéristiques de la bio-installation. Sont présentés les modèles cinétiques appliqués dans les problèmes du calcul du processus de la cultivation des micro-organismes. Est élaboré le modèle mathématique du processus continu de la cultivation anaérobie des micro-organismes avec l'obtention du bigaz. Est donnée la description de l'étude expérimentale.

Авторы: ***Юрина Ольга Александровна*** – инженер-программист, ЗАО «Сигнал», аспирант; ***Иванов Олег Олегович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологическое оборудование и пищевые технологии», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: ***Гатапова Наталья Цибиковна*** – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химическая инженерия», ГОУ ВПО «ТГТУ».